Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 3, Jul.-Agu. 2024, p. 301-319

Application of SSM-iCrop2 Model for Yield and Water Balance Simulation under Farmers' Conditions

S. JafarNodeh[1], A. Soltani[2]*, E. Soltani[3], A. Dadrasi[4], S. Rahban[1]

1 and 2- Graduated Student and Professor, Department of Agronomy, Colleg of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Afshin.soltani@gmail.com)
3- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Aboureyhan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran
4- Researcher in Environmental Center, Charles University, Prague, Czech Republic

Received: 10-10-2023 Revised: 29-01-2024 Accepted: 27-05-2024 Available Online: 27-05-2024	**How to cite this article:** Jafar Nodeh, S., Soltani, A., Soltani, E., Dadrasi, A., & Rahban, S. (2024). Application of SSM-iCrop2 model for yield and water balance simulation under grower field conditions. *Journal of Water and Soil, 38*(3), 301-319. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.84807.1343

Introduction

Accurate knowledge of water balance components is necessary to optimize water consumption in agriculture. On the other hand, measuring water balance components is expensive and difficult. Therefore, the use of models that can simulate water balance values is important for water management in agriculture and water used by plants. Crop simulation models have been turned into essential tools for studying plant production systems. In the SSM-iCrop2 models, it is presumed that diseases and weeds are optimally managed and will not affect growth and yield. Additionally, except in cases where the model accounts for specific nutrients such as nitrogen, it is generally assumed that nutrient deficiencies are eliminated through fertilization. Therefore, parameterized and evaluated models are designed to fit these conditions. These factors are present in the field and affect crop growth and yield as well as water use. However, in several cases it is required to estimate yield and water balance components and irrigation water volume under grower conditions. Naturally, models parameterized using experiments are unable to simulate these conditions. Therefore, a model must be prepared so that it can simulate the real conditions of farmers. In this study, the SSM-iCrop2 model has been calibrated for the real conditions of farmers, and the purpose of this study is to use the SSM-iCrop2 model in simulating water performance and water balance for farmers.

Materials and Methods

In this study, the SSM-iCrop2 model was calibrated for farmers conditions using variables such as yield and harvest index, which are available for farmers'fields or are cheap to measure. The effect of factors such as pests and diseases, weeds and unsuitable nutrients, density and sowing date entered the model along with the calibration of three parameters of radiation use efficiency, maximum leaf area and maximum harvest index for farmers' fields. Calibration was done by comparing the performance of farmers against the performance simulated by the model and by changing the parameters of radiation use efficiency (IRUE), maximum leaf area (LAIMX) and maximum harvest index (HIMAX). This calibration was done at Hashem Abad station in Gorgan for irrigated rice (paddy) and wheat. The simulated actual yield was calibrated with the actual yield. Due to the acceptable simulation of actual yields after calibration, it was presumed that other estimates made by the model are also reliable.

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.84807.1343

Results and Discussion

Measurement of water balance and other estimates of the model from growth and yield formation in the grower fields is expensive, but a calibrated model can estimate them at a low cost. In this study, it was shown that with the model calibrated for farmers' conditions, not other easily measured information (such as the irrigation water volume) can be obtained, with the assumption that the model accurately captures this information as well as performance. To evaluate the simulated real performance model, it was compared with the actual performance of farmers (Agricultural Jihad Report) after calibration. In addition to phenology, the SSM model simulates traits related to growth and yield, evapotranspiration values, irrigation water volume, runoff, available soil water during planting and harvesting, cumulative drainage, etc. The output of the model shows the amount of irrigation water is needed for a certain amount of performance in a given place (with specified rainfall and transpiration). The irrigation water volume calculated by the model was compared with the results of field tests from previous studies conducted by researchers at agricultural research centers. It was found that the model's output and the observed values were in good agreement. The root mean square error for rice and wheat was 216.6 and 157.6 kg per hectare, respectively, and the coefficient of variation and correlation coefficient were 4 and 85% for rice and 3 and 94% for wheat, respectively. Then, the irrigation water volume estimated by the model was evaluated and validated with the measured irrigation water volume in different crops (in Golestan province for different years). Based on the results of the evaluation, the coefficient of variation and the correlation coefficient for the simulated irrigation water volume were 8.9 and 98%, respectively, compared with the observed value. This calibration was done for rice (paddy) and irrigated wheat in the fields of Gorgan town, and the simulation and running were done using the meteorological statistics recorded in Hashem Abad weather station, Gorgan. Noting the fact that the actual yield has been simulated with good accuracy after the calibration, it was assumed that the other estimates of the model are also reliable. Thus, the calibrated model estimates them with low cost and appropriate accuracy and can complement field experiments.

Conclusion

This study discovered that the SSM_iCrop2 model, when calibrated for the conditions of farmers' fields, can accurately simulate both growth and yield traits as well as water balance characteristics. Notably, the model provides reliable estimates of irrigation water volume in farming scenarios, a crucial factor for agricultural planning and drought adaptation.

Keywords: Evapotranspiration, Index leaf area, Modeling, Water productivity, Water footprint

نشریه آب و خاک

https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۳، ص. ۳۱۹-۳۰۱

کاربرد مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد و بیلان آب برای شرایط مزارع کشاورزان

صفورا جافرنوده[۱]- افشین سلطانی[۲]*- الیاس سلطانی[۳]- امیر دادرسی[٤]- سمانه رهبان[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

چکیده

اطلاع از اجزای بیلان آب و حجم آب کاربردی برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی ضروری است از طرفی اندازه‌گیری آن‌ها پرهزینه و مشکل است. بنابراین استفاده از مدل‌هایی که بتواند مؤلفه‌های بیلان آب و حجم آب کاربردی را شبیه‌سازی کند برای مدیریت آب در کشاورزی اهمیت دارد. مدل SSM-iCrop2 در سال‌های اخیر در مطالعات متعدد استفاده شده است. در این مدل مشابه آزمایش‌ها، فرض می‌شود آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و نیز عناصر غذایی در مزرعه به نحو مطلوب مدیریت شده و تأثیری بر رشد و عملکرد ندارند. در حالی‌که در مزارع کشاورزان این عوامل وجود دارند و بر رشد و عملکرد گیاه و نیز مصرف آب اثر می‌گذارند. از سوی دیگر در موارد متعددی به برآورد عملکرد و مؤلفه‌های بیلان آب و حجم آب آبیاری در شرایط کشاورزان نیاز وجود دارد که طبیعتا مدل‌های پارامتریابی شده با آزمایش‌ها قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نیستند. در این مطالعه با استفاده از متغیرهایی مانند عملکرد و شاخص برداشت که برای مزارع کشاورزان موجود هستند یا با هزینه کم قابل اندازه‌گیری هستند مدل SSM-iCrop2 برای شرایط کشاورزان کالیبره شد. تأثیر عواملی نظیر آفات و بیماری‌ها، علف‌های هرز و تغذیه، تراکم و تاریخ کاشت نامناسب با کالیبراسیون سه پارامتر کارایی استفاده از تشعشع، حداکثر سطح برگ و حداکثر شاخص برداشت برای مزارع کشاورزان در مدل وارد شد. ابتدا خروجی مدل (میانگین ۱۵ ساله، در شهرستان‌های استان گلستان) با استفاده از داده‌های عملکرد واقعی (میانگین چند ساله در شهرستان‌های مختلف استان گلستان) کالیبره و ارزیابی شد. جذر میانگین مربعات خطا برای برنج و گندم آبی به‌ترتیب ۲۱۶/۶ و ۱۵۷/۶ کیلوگرم در هکتار و ضریب تغییرات و ضریب همبستگی برای برنج به‌ترتیب ۴ و ۸۵ درصد و برای گندم ۳ و ۹۴ درصد بود. سپس حجم آب آبیاری برآورد شده مدل با حجم آب آبیاری اندازه‌گیری شده در محصولات مختلف (در استان گلستان و در سال‌های مختلف) ارزیابی و صحت‌سنجی شد. بر اساس نتایج ارزیابی ضریب تغییرات و ضریب همبستگی برای حجم آب آبیاری شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهده شده برابر با ۸/۹ و ۹۸ درصد به‌دست آمد. بخش دیگر این مطالعه شبیه‌سازی روزانه و کاربرد مدل در این زمینه نشان داده شده است. این کالیبراسیون برای برنج (شلتوک) و گندم آبی در مزارع شهرستان گرگان انجام شد و شبیه‌سازی و اجرای با استفاده از آمار هواشناسی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان صورت پذیرفت. با توجه به این‌که پس از کالیبراسیون عملکردهای واقعی با دقت خوبی شبیه‌سازی شده است فرض شد سایر برآوردهای مدل نیز قابل اعتماد هستند. بدین ترتیب، مدل کالیبره شده با هزینه کم و دقت مناسب آن‌ها را برآورد می‌کند و می‌تواند تکمیل‌کننده آزمایش‌های مزرعه‌ای باشد. یکی از مهم‌ترین برآوردهای مدل حجم آب آبیاری در شرایط کشاورزان است که برای برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و سازگاری به کم‌آبی حیاتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تبخیرتعرق، ردپای آب آبی، شاخص سطح برگ، مدل‌سازی

---

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته و استاد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: Afshin.soltani@gmail.com)

۳- دانشیار، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۴- پژوهشگر مرکز علوم محیطی دانشگاه چالرز، پراگ، جمهوری چک

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.84807.1343

مقدمه

مدل‌های متعددی مانند WOFOST (Diepen *et al*., 1989)، EPIC (Williams *et al*., 1989)، OZCOT (Hearn, 1994)، DSSAT (Jones *et al*., 2013)، AquaCrop (Raes *et al*., 2009)، SSM (Soltani *et al*., 2013)، CropSyst (Stockle *et al*., 2003; Van Evert *et al*., 1994)، DSSAT (IBSNAT, 1993) و APSIM (McCown *et al*., 1996) برای شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی وجود دارد. از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی جهت بررسی وضعیت مدیریت، اثرات متقابل شرایط محیطی، بهره‌وری آب، تغییر اقلیم، خلأ عملکرد، تحلیل‌های مرتبط با رشد و عملکرد گیاهان مختلف استفاده می‌شود (Torabi *et al*., 2020). در این رابطه می‌توان به شبیه‌سازی گندم در خاورمیانه (Schoppach *et al*., 2017)، ذرت در ایالات متحده (Messina *et al*., 2015)، سویا در ایالات متحده (Sinclair *et al*., 2010)، عدس در شمال آفریقا (Ghanem *et al*., 2015) و جنوب آسیا (Guiguitant *et al*., 2017) اشاره نمود.

در اغلب مطالعات برآورد مدل‌ها برای شرایطی مشابه آزمایش‌ها انجام می‌شود با این فرض که عواملی مانند آفات و بیماری‌ها، تغذیه، علف‌های هرز وجود نداشته و یا تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ندارند. این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی مزارع کشاورزان (شرایط واقعی) نیستند زیرا در مزارع کشاورزان وجود عواملی مانند آفات بیماری‌ها، تغذیه نامناسب، مدیریت زراعی نامطلوب منجر به کاهش عملکرد می‌شود. بنابراین برای تعیین عملکرد واقعی در شرایط کشاورزان لازم است شرایط واقعی مزارع در مدل‌ها لحاظ شود. برای مثال، در یک تلاش گروهی سعی شده است تأثیر بیماری‌ها با مدل‌های شبیه‌سازی بررسی شود. برای این منظور مکانیسم‌های آسیب مرتبط با چهار بیماری اصلی گندم (زنگ قهوه‌ای و زرد، لکه سپتوریایی و سفیدک پودری) را با استفاده از پنج مدل شبیه‌سازی (DSSAT-Nwheat، HERMES، SSM-WHEAT، WHEATPEST و WOFOST_GT) مورد بررسی قرار دادند و با توجه به شدت بیماری و تأثیر آن بر شاخص سطح برگ، کاهش نسبی عملکرد گندم را برآورد کردند (Bregaglio *et al*., 2021). از مدل‌های حاصله می‌توان برای مطالعات بیش‌تر مثلا تأثیر بیماری‌ها در شرایط تغییر اقلیم آینده استفاده نمود.

مدل‌های SSM قبلا برای سه سطح تولید پتانسیل، آب محدود و نیتروژن محدود ایجاد و استفاده شده‌اند (Soltani & Sinclair; 2012; Soltani *et al*., 2013; Soltani *et al*., 2018; Soltani *et al*., 2019; Soltani *et al*., 2020a). مدل SSM با وجود نیاز به تعداد کم‌تر پارامترهای ورودی از دقت خوبی برخوردار است (Soltani & Sinclair, 2015). همچنین از مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop به صورت گسترده در مطالعات با موضوعات گوناگون از جمله فیزیولوژی محصول و اندام‌های گیاهی، ارزیابی مدیریتی و انتخاب ژنوتیپ‌ها در بهبود عملکرد محصول (Vadez *et al*., 2017; Sinclair *et al*., 2020; Soltani & Sinclair, 2011;) شبیه‌سازی رشد و عملکرد عدس (Ghanem *et al*., 2015) ارزیابی دقت مدل در برآورد عملکرد گندم (Wolfgang Fuchs, 2021)، پارامتریابی و ارزیابی محصولات ذرت، سیب زمینی، چغندرقند (Manschadi *et al*., 2019) پیش‌بینی پویایی نیتروژن (Manschadi *et al*., 2022) استفاده شده است.

این مدل در مطالعات داخلی و خارجی برای شبیه‌سازی در شرایط پتانسیل ارزیابی و پارامتریابی شده است. در یک بررسی برای شبیه سازی عملکرد پنبه از مدل SSM استفاده شد (Kamari *et al*., 2019) در مطالعه ایشان مقدار RMSE برای عملکرد پنبه برابر با ۷۷/۶ گرم در متر مربع و حدود ۱۳ درصد میانگین عملکرد بود. در مطالعه ایشان ضریب همبستگی شبیه‌سازی شده و گزارش شده برابر با ۰/۷۲ بود. طی یک مطالعه (Rahban *et al*., 2021) با استفاده از مدل SSM_iCrop2 فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب کلزای آبی را پیش بینی کردند. ایشان با توجه به مقادیر آماره‌های مربوطه (R2, RMSE, CV) کارایی مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزای آبی را رضایت-بخش دانستند. در مطالعه ایشان مقادیر ضریب تبین، ضریب تغییرات و جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه کلزا به‌ترتیب ۰/۸۷، ۱۸ درصد و ۶۷ گرم در متر مربع گزارش شد.

قانم و همکاران (Ghanem *et al*., 2015) با استفاده از مدل SSM-Legumes به شبیه‌سازی رشد و عملکرد عدس در خاورمیانه (سوریه و لبنان) با ویژگی آب و هوایی رطوبت کم، درجه حرارت بالا و سرمای زمستانه در ارتفاعات و نوسانات شدید بارندگی، پرداختند. مدل عملکرد عدس را با دقت خوبی برآورد کرد به‌طوری‌که مقادیر R^2، RMSE و CV شبیه‌سازی عملکرد عدس به‌ترتیب برابر با ۰/۶۷ درصد، ۳۰۸/۳۶ کیلوگرم در هکتار و ۱۴/۲۸ درصد، بود.

مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop برای پیش‌بینی پویایی و رشد و نیتروژن ارقام زمستانه گندم (*Triticum aestivum*) در بخشی از منطقه اتریش با شرایط آب و هوایی معتدل ارزیابی مورد قرار گرفت. اطلاعات دقیق گیاه و خاک (داده‌های واقعی) از سه آزمایش مزرعه‌ای با ۴ رقم گندم جمع‌آوری شد. دوره زمانی شبیه‌سازی‌شده ویژگی‌های محصول در طول فصل رشد، مطابقت خوبی با داده‌های مشاهده‌شده نشان داد. مقادیر CV و RMSE برای ماده خشک به‌ترتیب ۵/۹ درصد و ۱۱۵/۶ گرم در متر مربع و برای عملکرد دانه ۱/۹ درصد و ۶۰/۵ گرم در متر مربع بود. نتایج مطالعه ایشان دقت مدل را در پیش‌بینی رشد، پویایی نیتروژن و عملکرد گندم را در تأیید کرد. ایشان معتقدند ساختار نسبتا ساده و درجه شفافیت بالا، مدل SSM-iCrop را برای ادغام در

ابزارهای کشاورزی هوشمند برای بهبود تصمیم‌گیری زراعی در تولید محصول مناسب می‌کند (Manschadi *et al*., 2022).

در مطالعه ی دیگر پارامترهای گیاهی و ارزیابی عملکرد علوفه یونجه با استفاده از مدل SSM-iCrop2 در مناطق عمده تولید آن در ایران بررسی شد. ارزیابی مدل بر اساس داده‌های آزمایشی مستقل از مرحله پارامتریابی انجام شد. مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده بین ۶۴۶ تا ۴۰۴۲ با میانگین ۱۷۱۷ گرم در متر مربع و نیاز آبی یونجه حاصل از برنامه NETWAT بین ۵۱۴۰ تا ۱۲۶۹۰ با میانگین ۸۷۴۶ متر مکعب در هکتار بود. عملکرد شبیه‌سازی شده و نیاز آبی یونجه به‌ترتیب بین ۶۹۳ تا ۳۲۹۶ با میانگین ۱۶۵۴ گرم در متر مربع و ۴۰۹۳ تا ۱۶۸۷۴ با میانگین ۱۰۹۴۰ متر مکعب در هکتار برآورد شد. نتایج ارزیابی مطالعه ایشان نشان داد، ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) برای عملکرد تک چین شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهده شده به‌ترتیب ۰/۷۹، ۸۸/۳ گرم در متر مربع و ۲۶/۷۸ درصد، برای عملکرد علوفه سالانه به‌ترتیب ۰/۹۰، ۳۴۴/۴ گرم در متر مربع، ۲۰/۰۵ درصد و برای نیاز آبی یونجه به‌ترتیب ۰/۴۳، ۳۵۰۳ متر مکعب در هکتار و ۴۰ درصد به‌دست آمد (Pourshirazi *et al*., 2023).

در مطالعه حاضر مدل SSM-iCrop2 برای شرایط مزارع کشاورزان با داده‌های واقعی عملکرد (گزارش جهاد کشاورزی) کالیبره می‌شود. این کالیبراسیون برای محصولات برنج تازه (شلتوک) و گندم آبی (گیاهان مهم استان گلستان) انجام می‌گردد. هدف کاربردی این است مدل کالیبره شده برای برآورد عملکرد و دیگر متغیرها مثل مؤلفه های بیلان آب، بهره‌وری و غیره در شرایط مزارع کشاورزان مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه، برآورد حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب آبیاری در شرایط کشاورزان از اهمیت زیادی برخوردار است.

روش‌ها

ساختار مدل SSM-iCrop2 به گونه‌ای است که توانایی شبیه سازی مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، عملکرد را دارد. واکنش گیاه به عوامل محیطی و مدیریت زراعی در مدل قابل اجرا بوده به‌طوری‌که شبیه‌سازی به‌صورت روزانه و با استفاده از اطلاعات آب و هوا و خاک و پارامترهای گیاهی انجام می‌شود (Soltani & Sinclair; 2011).

تشکیل عملکرد مدل با توجه به کل ماده خشک تولید شده در دوره پر شدن دانه و نیز ماده خشک تخصیص‌یافته به دانه شبیه‌سازی می شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت انجام می‌شود (Soltani & Sinclair, 2011). مدل توانایی شبیه‌سازی نمو فنولوژیک، گسترش و پیری برگ، تجمع و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد، مؤلفه‌های موازنه آب خاک (مانند تبخیر و تعرق گیاه؛ میزان بارندگی، آب آبیاری، رواناب، زه‌کشی) را دارد. مدل شبیه‌سازی را به‌صورت روزانه انجام می‌دهد. نحوه استفاده از مدل در سایت https://sites.google.com/view/ssm-crop-models وجود است.

داده‌های ورودی مدل شامل اطلاعات هواشناسی (حداکثر دمای روزانه، حداقل دمای روزانه، تشعشع خورشیدی، بارندگی روزانه)؛ مدیریت‌های زراعی؛ اطلاعات خاک (عمق خاک، زه‌کشی، حد ظرفیت زراعی و غیره) و پارامترهای گیاهی می‌باشند (جدول ۱). پارامترهای گیاهان گونه‌ها و ارقام (بیش از ۵۰ گیاه زراعی و باغی دیم و آبی) در سایت www.SSM-crop-models.net موجود است. اگر چه مدل SSM-iCrop2 به ۳۷ پارامتر نیاز دارد اما، تعداد واقعی مربوط به پارامترها تقریباً نیمی از تعداد کل است (بین ۱۵ تا ۲۰ بسته به گونه‌های گیاهی) زیرا بسیاری از پارامترها به هم مرتبط هستند و برخی پارامترها برای برخی از گونه‌ها مهم نیستند پارامترهای گیاهی (برای محصولات برنج و گندم آبی) بر اساس مطالعات قبلی استفاده شده است (Soltani *et al*., 2020b; Karamat *et al*., 2021). در این مطالعه شبیه‌سازی برنج برای رقمی دیررس با عملکرد متوسط و گندم رقمی مشابه تجن صورت می‌گیرد. مدل SSM-iCrop2 قبلا برای شبیه‌سازی تبخیرتعرق/ آب آبیاری و عملکرد گیاهان برنج (Karamat *et al*., 2021) و گندم آبی (Zand *et al*., 2019) در شرایط کشور پارامتریابی و ارزیابی شده است (شکل پیوست).

مبنای کار مطالعه حاضر، بر اساس مطالعات قبلی (Soltani *et al*., 2018; Soltani *et al*., 2019; Soltani *et al*., 2020b; Soltani *et al*., 2020c) انجام شده‌است. در مطالعه ایشان برای پارامتریابی مدل از مقالات متعدد، گزارشات و پایان نامه‌های دانشجویی و تحقیقاتی محلی استفاده شده است (در مجموع بیش از ۳۰۰ مطالعه) و سپس پارامتریابی برای ۳۲ گیاه اصلی کشاورزی ایران انجام شد (Soltani *et al*., 2019; Soltani *et al*., 2020b). مدل SSM-iCrop2 نسخه ساده شده SSM است که برای شبیه‌سازی تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی در سطح وسیع مناسب است (Soltani *et al*., 2013). این مدل دارای کد باز بوده و از صفحه گسترده اکسل برای ورودی و خروجی داده‌ها استفاده می‌کند، به همین علت کار با آن آسان است. در مطالعه اخیر سلطانی و همکاران (Soltani *et al*., 2020a) مدل SSM-iCrop2 برای بیش از ۳۰ گونه گیاهی (۱۸ گیاه زراعی، ۵ صیفی‌جات و ۱۳ محصول باغی) پارامتریابی و ارزیابی شده است.

جدول ۱- پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل SSM-iCrop2

Table 1- Required parameters inputs for running the SSM-iCrop2 model

	پارامتر **Parameter**	واحد **Unit**
روابط آب Water relations	واحد دمایی نرمالیزه شده که در آن رشد عمقی ریشه آغاز می‌گردد Fraction of tuHAR for beginning root growth (frBRG)	-
	واحد دمایی نرمالیزه شده که در آن رشد عمقی ریشه متوقف می‌شود Fraction of tuHAR for termination root growth (frTRG)	-
	عمق اولیه ریشه در هنگام نشاء یا شروع رشد Initial depth of roots at transplanting or beginning of growth (iDTPORT)	میلی‌متر mm
	حداکثر عمق موثر استخراج آب از خاک Maximum effective depth of water extraction from soil (MEED)	میلی‌متر mm
	ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient (TEC)	کیلو پاسکال kPa
	آستانه FTSW برای رشد FTSW threshold when biomass production starts to decline (WSSG)	-
	آستانه FTSW برای نمو سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline (WSSL)	-
	مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit (WSSD)	-
اطلاعات هواشناسی Meteorology data	حداکثر دمای روزانه Maximum temperature (TMAX)	درجه سانتی‌گراد ºC
	حداقل دمای روزانه Minimum temperature (TMIN)	درجه سانتی‌گراد ºC
	تابش خورشیدی روزانه Solar radiation (SRAD)	مگاژول در متر مربع در روز $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$
	بارندگی روزانه Daily precipitation (RAIN)	میلی‌متر mm
اطلاعات مکانی Spatial data	عرض جغرافیایی Latitude	درجه degree
	غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر Atmosphere CO_2 concentration (CO_2)	میکرومول بر مول $\mu mol\ mol^{-1}$
	ضریب محاسبه کمبود فشار بخار Vapor pressure deficit calculation coefficient (VPDF)	-
	مقدار تغییر دما Temperature change (tchng)	درجه سانتی‌گراد ºC
اطلاعات خاک Soil data	شیب زمین Land slope (SLOPE)	متر در متر $m\ m^{-1}$
	ضریب تغییر بارندگی Precipitation coefficient of variation (pchng)	-
	عمق خاک Soil depth (SOLDEP)	میلی‌متر mm
	آلبیدوی خاک Soil albedo (SALB)	-
	عامل زهکشی خاک Soil drainage factor (DRAINF)	-
	عامل زهکشی سطحی Surface drainage factor (SDRAINF)	-
	مقدار آب در خاک پس ازخروج آب ثقلی Soil water after release of gravitational water (DUL)	میلی‌متر در میلی‌متر $mm\ mm^{-1}$
	حداقل مقدار آب در خاک Lowest level of soil water (LL)	میلی‌متر در میلی‌متر $mm\ mm^{-1}$

	مقدار آب در خاک در زمان اشباع Soil water at saturation (SAT)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm^{-1}
	مقدار آب قابل دسترس خاک Volumetric soil water content available for extraction by crop roots (EXTR)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm^{-1}
	شماره منحنی خاک Curve number (CN)	-
اطلاعات مدیریت زراعی management operations data	تاریخ کاشت Planting date (PDOY)	روز day
	تاریخ شروع شبیه‌سازی آب خاک Start of soil water simulation date (SimDoy)	روز day
	تاریخ شروع به جستجو برای تاریخ کاشت Start of searching for planting date (FPDoy)	روز day
	طول مدت جستجو برای کاشت Duration of searching for planting (SearchDur)	روز day
	سطح آستانه آبیاری Irrigation threshold level (IRGLVL)	-
	تاریخی که باید گیاه برداشت شده باشد تا آماده سازی زمین برای کشت بعدی امکان‌پذیر باشد Termination of plant growth date (StopDoy)	روز day
	حداکثر ارتفاع آب Minimum water height (mnWH)	میلی‌متر mm
	حداقل ارتفاع آب Maximum water height (mxWH)	میلی‌متر mm
	اولین آب خاک در شروع شبیه‌سازی Initial soil water at start of simulation (ISW)	میلی‌متر mm

نتایج آزمون کارایی مدل برای عملکرد، آب خالص آبیاری، تبخیر تعرق از دقت خوبی برخوردار بود (Soltani *et al*., 2020b). به‌طوری که میانگین مربع خطا به‌عنوان درصدی از میانگین عملکرد مشاهده شده برای محصولات زراعی دانه‌ای ۱۸ درصد، برای محصولات زراعی غیردانه‌ای ۱۴ درصد، برای سبزیجات ۱۴ درصد و برای درختان میوه ۲۸ درصد بود. از این مدل برای مطالعات خلأ عملکرد و برآورد پتانسیل محصولات مختلف استفاده شده است که از این بین می‌توان به محصول پنبه (Kemari *et al*., 2020)؛ سیب‌زمینی (Dadrasi *et al*., 2020)؛ یونجه (Pourshirazi *et al*., 2023) گندم (Zand *et al*., 2019) باقلا (Torabi *et al*., 2020; Bagheri & Torabi, 2015)؛ سویا (Akbari & Soltani, 2017; Rassam & Soltani, 2007; Nehbandani *et al*., 2015)، نخود و عدس دیم (Arabameri *et al*., 2020) اشاره نمود. این پارامتریابی و ارزیابی برای شرایط آزمایش‌های کشاورزی برای شرایط آبی و دیم با فرض عدم محدودیت عناصر غذایی، آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز صورت گرفته است.

پارامترهای گیاهی متعددی برای شبیه‌سازی در مدل وجود دارد اما با توجه به ماهیت مدل و فیزیولوژی تأثیر این عوامل بر رشد و عملکرد گیاهان، فرض شد این عوامل از طریق کاهش سه پارامتر موجب کاهش رشد و عملکرد گیاهان می‌شوند. این سه پارامتر عبارتند از:

۱. LAIMX حداکثر شاخص سطح برگ قابل دستیابی در شرایط مطلوب رشد
۲. IRUE کارایی استفاده از تشعشع فعال فتوسنتزی و تبدیل آن به ماده خشک
۳. HImax حداکثر شاخص برداشت در شرایط مطلوب رشد

فرض شد اعمال تغییرات در این سه پارامتر، برای کالیبراسیون مدل کافی باشد. بنابراین فقط با استفاده از تغییر دادن این سه پارامتر عملکرد واقعی محصولات برنج و گندم آبی شبیه‌سازی شد. این پارامترها تا حدی تغییر داده شد که خروجی مدل به آمار عملکرد واقعی کشاورزان نزدیک شود. در به‌کارگیری مدل کالیبره شده فرض می‌گردد چون عملکرد واقعی کشاورزان (گزارش و مشاهده شده) با عملکرد واقعی شبیه‌سازی توسط مدل به‌هم نزدیک هستند، سایر خروجی‌های مدل از جمله تخمین آب مصرفی، میزان تبخیر تعرق، ماده خشک و فنولوژی نیز مقادیری نزدیک (شبیه) به واقعیت خواهند بود و می‌توان از برآوردهای آن‌ها با مدل (که با هزینه بسیار بسیار کم‌تر و در زمان فوق العاده کوتاه‌تر صورت می‌گیرد) برای ارزیابی‌های مورد نیاز بعدی استفاده نمود. مبنای این فرض آن است که در مدل SSM-iCrop2 پیش‌بینی تعرق بر اساس پیوستگی بین تعرق و تولید ماده خشک صورت می‌گیرد. بنابراین، کاهش در تولید اثرات خود را بر تعرق و تبخیرتعرق خواهد گذاشت. البته مدل با داده‌های محدود برای حجم آب آبیاری هم ارزیابی گردید.

قابلیت مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و حجم آب کاربردی در شرایط کشاورزان ارزیابی شد. عملکرد واقعی کشاورزان از نقاط مختلف استان مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ و نیز اندازه‌گیری‌های حجم

آب کاربردی کشاورزان بر اساس گزارش‌های موجود برای این منظور استفاده گردید. داده‌های واقعی حجم آب آبیاری برای شرایط مزارع در گیاهان گوجه‌فرنگی (Abbasi *et al.*, 2021)، سویا (Kiani *et al.*, 2022)، زیتون (Abbasi *et al.*, 2020)، سیب‌زمینی (Baghani *et al.*, 2019)، هلو (Akbari *et al.*, 2021) و برنج (Razzaghi *et al.*, 2019) وجود داشت که در شرایط آب و هوایی سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ و در شهرهای مختلف استان گلستان (علی‌آباد، کردکوی، گرگان و بندرگز) انجام شده بود، لذا مدل نیز برای همان سال و برای همان مکان‌ها (ایستگاه‌های هواشناسی، خاک و اقلیم) اجرا شد، و سپس با داده‌های واقعی گزارش شده در مطالعات قبلی مقایسه شدند. خروجی مدل با داده‌های واقعی با استفاده از آماره‌های nRMSE و ضریب همبستگی (r) ارزیابی و صحت‌سنجی شد. این ارزیابی برای عملکرد دانه برنج و گندم (شکل ۱) و حجم آب آبیاری (شکل ۲) انجام شده است.

برای نشـان دادن یک نمونه کاربرد، شـبیه‌سـازی با مدل کالیبره شده در شرایط مزارع کشاورزان برای ایستگاه هاشم آباد گرگان انجام شد. ایستگاه هاشم‌آباد گرگان دارای اقلیم ۶۱۰۲ (دارای درجه روز رشد یا زمان حرارتی با مقادیر ۵۹۵۰ الی ۷۱۱۱، شاخص خشکی ۰/۲۶۹۶ الی ۰/۳۸۹۳ و نوسـانات دمای فصـلی ۳/۸۳۳ الی ۸/۳۵۵) برای سـال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ و به‌مدت ۱۵ سـال اجرا شـده اسـت. این منطقه از گرگان دارای کد خاک HC5 اسـت و مشـخصـات خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی خاک غالب شهرستان گرگان محدوده ایستگاه هواشناسی هاشم آباد گرگان

Table 2- The dominant soil characteristics of Gorgan township, Hashemabad meteorological station district, Gorgan

نوع خاک Soil code	عمق خاک (mm) SOLDEP	آلبیدوی خاک SALB	شماره منحنی خاک CN	ضریب زهکشی عمقی خاک DRAINF	آب خاک در اشباع SAT	آب خاک در ظرفیت زراعی DUL	آب در نقطه پژمردگی دائم LL
HC5-Clay MF120	1200	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233

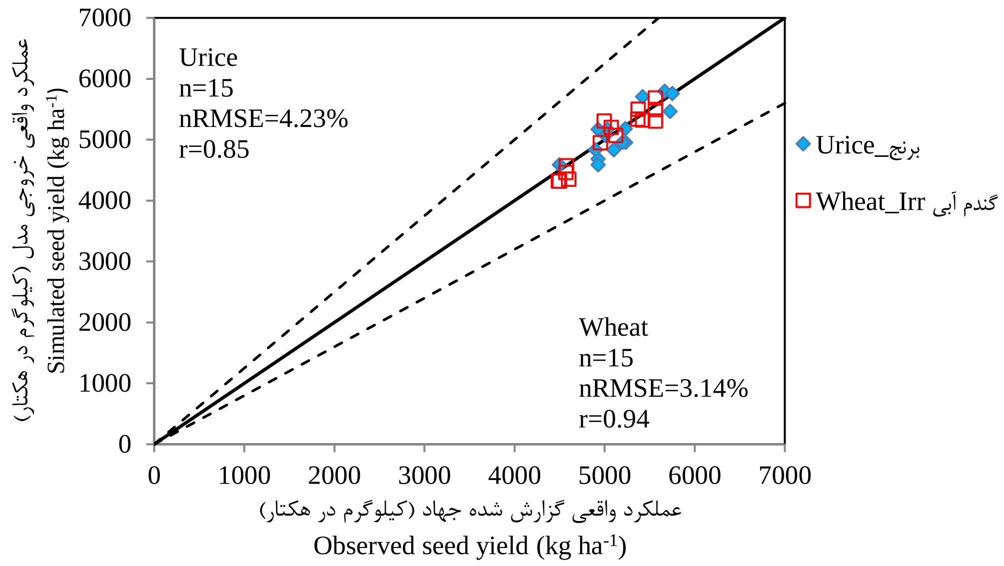
نتایج و بحث

برآورد پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی و برنج در جدول ۳ ارائه شده است. به‌طور مثال در گیاه زراعی برنج (با عملکرد متوسط و دیررس) مقادیر LAIMX در شرایط پتانسیل ۳/۵ و در برای شرایط کشاورزان ۲/۷۷ کالیبره شد. برای گندم آبی در شرایط پتانسیل ۶/۵ و در شرایط مزارع کشاورزان ۳/۷۷ کالیبره شد. شایان ذکر است که برآورد پارامترها برای شرایط پتانسیل از مطالعات قبلی اخذ شده‌اند (Zahed *et al.*, 2019; Soltani *et al.*, 2020b; Karamat *et al.*, 2021). کاهش در برآوردها برای شرایط واقعی کشاورز به دلایل مختلف مثل تاریخ کاشت نامناسب، تراکم و عدم مصرف بهینه کود و سموم شیمیایی، کم‌آبیاری می‌باشند. شکل ۱ عملکرد واقعی شبیه‌سازی شده با مدل (میانگین ۱۵ ساله شهرستان‌های مختلف استان) را در برابر عملکرد واقعی کشاورزان (میانگین چندساله شهرستان‌های مختلف استان اخذشده از سازمان جهاد کشاورزی) پس از کالیبراسیون مقایسه می‌کند (شکل ۱). عملکرد واقعی (گزارش جهاد کشاورزی) گندم آبی ۴۴۸۷ و عملکرد واقعی (شبیه‌سازی مدل) برابر با ۴۳۱۸ کیلوگرم در هکتار بود تفاوت مدل با شرایط واقعی ۳/۷۴ درصد معادل ۱۶۸ کیلوگرم در هکتار، و برای شلتوک (رقم دیررس با عملکرد متوسط) عملکرد واقعی گزارش شده و برآورد مدل به‌ترتیب ۴۸۹۹/۷ و ۴۸۳۳/۲۴ کیلوگرم در هکتار بود و تفاوت بین آن ۱/۲۶ درصد معادل ۶۶ کیلوگرم در هکتار بود. با توجه به برآوردها و پراکنش نقاط مربوط به عملکرد می‌توان نتیجه گرفت که کالیبراسیون مدل به خوبی انجام شده است.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل (Y_P) و واقعی (Y_{act}) گیاهان برنج و گندم آبی

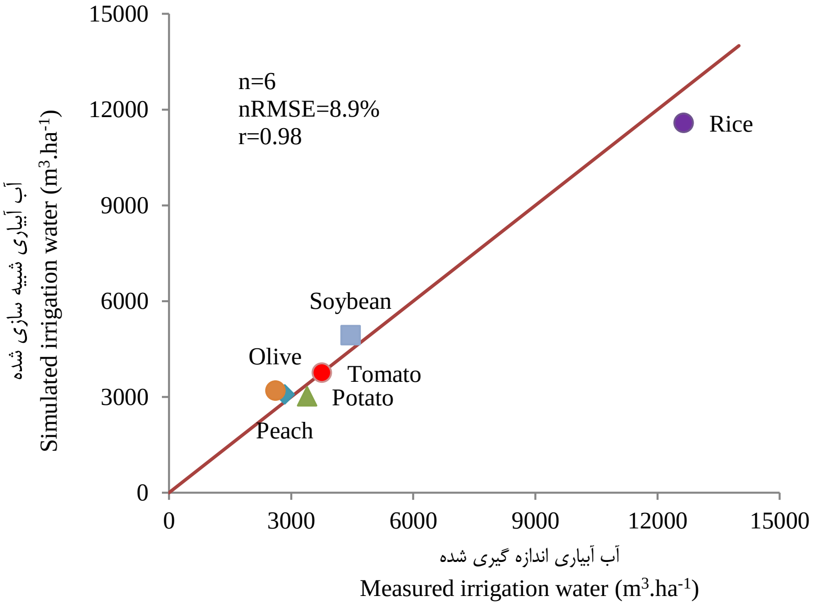
Table 3- Parameters used to simulate potential (Yp) and actual (Yact) yield of rice and blue wheat plants.

پارامتر Parameter	برنج Urice		گندم آبی Wheat Irr	
	پتانسیل Potential	واقعی Actual	عملکرد پتانسیل Potential	عملکرد واقعی Actual
حداکثر شاخص سطح برگ LAIMX	3.5	2.77	6.5	3.77
حداکثر شاخص برداشت HImax	0.38	0.31	0.5	0.45
کارایی استفاده از تشعشع IRUE	2.2	1.87	2.2	1.83



شکل ۱- میانگین ۱۵ ساله عملکرد واقعی شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد واقعی گزارش شده (میانگین چندساله براساس داده‌های جهاد کشاورزی) برای برنج (شلتوک) و گندم آبی (کیلوگرم در هکتار) در سطح مزارع شهرستان‌های مختلف استان گلستان

Figure 1- Actual yield simulated by SSM model versus the reported actual yield (long-term data based on the Agricultural Jihad data) for rice (paddy) and irrigated wheat (kg.ha^{-1})

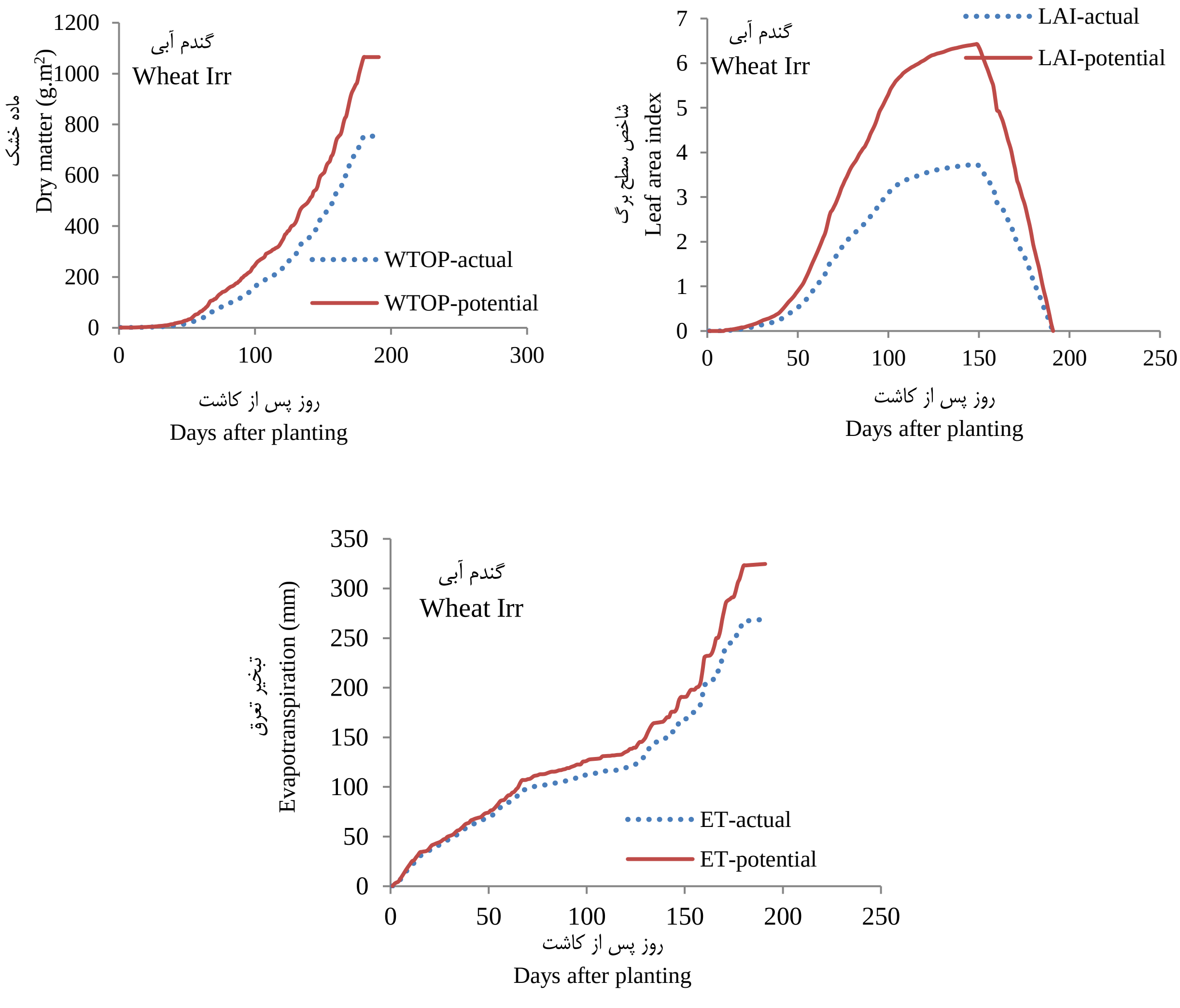


شکل ۲- مقایسه برآوردهای سیستم از حجم آب آبیاری (متر مکعب در هکتار) در شرایط کشاورزان در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به گیاهان گوجه‌فرنگی (Abbasi *et al.*, 2021)، سویا (Kiani *et al.*, 2022)، زیتون (Abbasi *et al.*, 2020)، سیب‌زمینی (Baghani *et al.*, 2019)، هلو (Akbari *et al.*, 2021) و برنج (Razzaghi *et al.*, 2019)

Figure 2- Comparison of system estimates of the volume of irrigation water (m^3.ha^{-1}) in the conditions of farmers against the measured values related to tomato (Abbasi *et al.*, 2021), soybean (Kiani *et al.*, 2022), olive (Abbasi *et al.*, 2020), potato (Baghani *et al.*, 2019), peach (Akbari *et al.*, 2021) and rice (Razzaghi *et al.*, 2019)

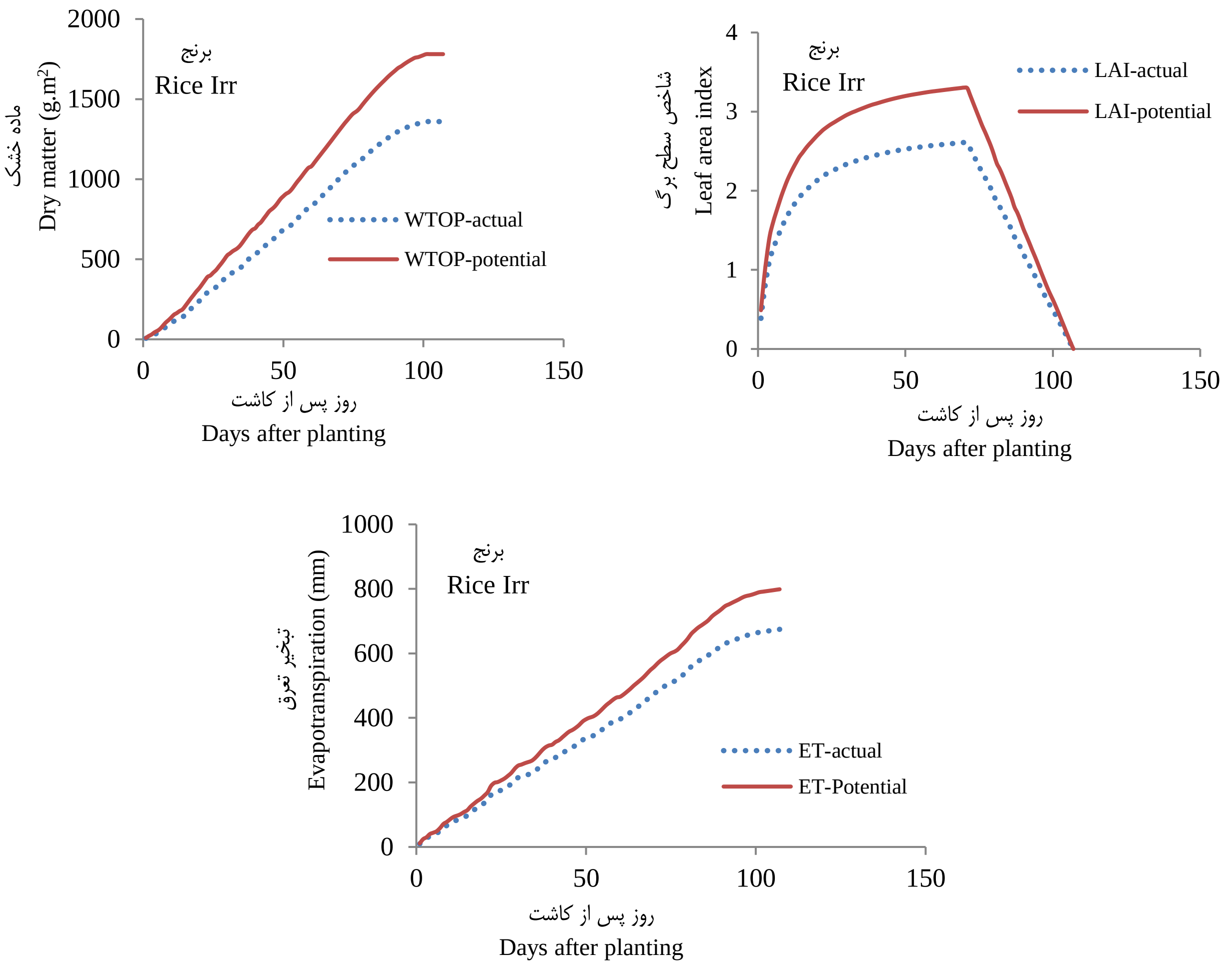
برای ارزیابی و اطمینان از برآوردهای سیستم، خروجی مدل با داده های واقعی اندازه‌گیری شده (گزارش شده از مطالعات مراکز تحقیقات کشاورزی در شرایط مزرعه) مقایسه شد. نتایج این مقایسه بیان‌گر تطابق خوب و مناسب مدل با داده‌های واقعی بود (شکل ۲). بنابراین استفاده از این سیستم و مدل کالیبره شده برای شرایط واقعی، برای مطالعات مرتبط با آب در کشاورزی کاربردی و مفید می‌باشد.

تغییر هر یک از پارامترهای ارائه شده در جدول ۳ باعث تغییراتی در آب مصرفی، عملکرد ماده خشک و تبخیر تعرق می‌شوند که همه این عوامل به تغییرات عملکرد منتهی می‌شود. برای نمونه در شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیر تعرق در طی فصل رشد برنج (شلتوک) و گندم آبی در شرایط پتانسیل و مزرعه واقعی کشاورزان (هر دو از خروجی مدل) ارائه شده است. این شکل‌ها (شکل ۳ و ۴) بیان‌گر تغییرات روزانه شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیرتعرق روزانه محصولات در طول فصل رشد می‌باشند. همان‌طور که مشخص است تغییرات این متغیرها در شرایط مزارع کشاورزان متفاوت از شرایط پتانسیل با فرض عدم تأثیر کمبود عناصر غذایی و آب و محدودیت آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز است.



شکل ۳- شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیرتعرق شبیه‌سازی شده با مدل برای شرایط پتانسیل (خط ممتد) و واقعی (خط منقطع) گندم آبی

Figure 3- Index of leaf area, dry matter and Evapotranspiration simulated by the model for potential (continuous line) and actual (dashed line) conditions of water wheat



شکل ٤- شاخص سطح برگ، ماده خشک و تبخیرتعرق شبیه‌سازی شده برای شرایط پتانسیل (خط ممتد) و واقعی (خط منقطع) برنج (شلتوک عملکرد متوسط و دیررس)

Figure 4- Leaf surface index, dry matter and simulated evapotranspiration for potential (continuous line) and actual (dashed line) conditions of rice (medium and late yield paddy)

در این مطالعه مدل با استفاده از سه پارامتر LAIMX ،HImax و IRUE و متغیرهای ساده‌ای مانند عملکرد که اندازه‌گیری آن راحت است و اطلاعات واقعی آن در دسترس است، کالیبره شد. پس از کالیبراسیون مدل از آن برای برآورد مؤلفه‌های مهم بیلان آب در مزرعه که اندازه‌گیری آن‌ها به‌راحتی امکان‌پذیر نیست، استفاده شد (جدول ۴). با استفاده از این برآوردها مدل کالیبره شده می‌توان به اطلاعات مهمی نظیر بهره‌وری آب نیز دست پیدا کرد. به‌طوری‌که با برآوردهای مدل می‌توان گزارش کرد برای یک مقدار مشخص از عملکرد چه میزان آب (حجم آبیاری و تعداد آبیاری) صرف می‌شود.

از دیگر خروجی‌های مدل صفات مرتبط با فنولوژی و رشد، وضعیت ماده خشک تجمعی و عملکرد دانه می‌باشد که برخی از این اطلاعات در جدول ۵ ارائه شده است. این اطلاعات می‌تواند در محاسبات مربوط به بهره‌وری آب، برنامه‌ریزی برای انتخاب تاریخ کاشت مناسب، درآمد اقتصادی ناشی از عملکرد مورد استفاده قرار گیرد.

در مطالعه‌ای کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی (رقم مهرگان) تحت شرایط تنش آبی، با انجام آزمایشی (۵ تیمار بدون تنش، تنش در مرحله آبستنی، تنش در مرحله گلدهی، تنش در مرحله شیری شدن و تنش در مرحله خمیری) در منطقه ورامین ارزیابی شد (Shiukhy Soqanloo *et al.*, 2023). بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تفاوت قابل توجهی وجود نداشت. مقادیر مشاهده شده برای روز تا پایان پرشدن دانه، در شرایط بدون تنش، تنش در مراحل آبستی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن به‌ترتیب ۲۲۲، ۲۱۹، ۲۱۹، ۲۲۱، ۲۲۱ روز بود که با مقادیر شبیه‌سازی شده (به‌ترتیب ۲۲۴، ۲۲۱، ۲۲۰، ۲۲۱) اختلاف ناچیزی داشت.

جدول ٤- مؤلفه‌های بیلان آب، بهره‌وری و ردپای آب آبی برآورد شده برای شرایط واقعی و پتانسیل برای گیاهان برنج (شلتوک) و گندم آبی

Table 4- Water balance components, productivity and water footprint estimated for actual conditions and potential for rice plants and water wheat

مؤلفه‌های بیلان آب	برنج تازه (شلتوک) Rice		گندم آبی Wheat irr	
Water Balance Components	پتانسیل Potential	واقعی Actual	پتانسیل Potential	واقعی Actual
آب قابل دسترس خاک در زمان کاشت (mm) IPASW	180	180	223	226
آب قابل دسترس خاک در زمان برداشت (mm) ATSWSL	79	79	113	108
بارندگی تجمعی (mm) CRAIN	92	92	296	296
آب آبیاری تجمعی (mm) CIRGW	942	890	138	85
رواناب تجمعی (mm) CRUNOF	0	0	2.38	2.48
تبخیر تجمعی (mm) CE	195	214	159	159
تعرق تجمعی (mm) CTR	569	434	231	164
زه کشی تجمعی (mm) CDRAIN	195	197	72	74
تبخیر تعرق (mm) ET	764	648	389	323
بهره وری آب* ($kg.m^{-3}$) WP	0.80	0.54	4.76	5.08

*بهره وری آب آبیاری (نسبت عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار بر حجم آب آبیاری برحسب متر مکعب در هکتار) محاسبه شده است.

*Irrigation water productivity (defined as the ratio of grain yield in kilograms per hectare to the volume of irrigation water in cubic meters per hectare) has been calculated.

جدول ٥- صفات گیاهی شبیه‌سازی شده در شرایط واقعی و پتانسیل برای گیاهان برنج و گندم آبی

Table 5- Simulated plant traits in actual and potential conditions for rice and blue wheat plants

صفات گیاهی Plant traits	برنج تازه (شلتوک) Rice		گندم آبی Wheat	
	پتانسیل Potential	واقعی Actual	پتانسیل Potential	واقعی Actual
روز از کاشت تا آغاز پرشدن دانه Days to beginning seed growth	74	74	143	143
روز از کاشت تا رسیدگی برداشت Days to maturity	113	113	181	181
عملکرد ماده خشک ($g. m^{-2}$) dry matter yield	1756	1340	1184	839
عملکرد دانه ($g. m^{-2}$) grain yield	656	416	569	374
شاخص برداشت Harvest index	0.37	0.31	0.5	0.45
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum harvest index	3.31	2.77	6.4	3.75
عملکرد ($Kg.ha^{-1}$) Yield	7630	4833	6580	4318

همچنین برای عملکرد دانه مشاهده شده در مزرعه به‌ترتیب برابر با ۵۷۸۳/۶، ۵۴۲۳، ۵۱۶۰، ۵۰۰۶ و ۵۰۰۱ کیلوگرم در هکتار و برای مقادیر شبیه‌سازی شده به‌ترتیب ۵۶۳۰/۴، ۵۲۲۰، ۴۶۸۰ و ۴۸۸۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد، نتایج مطالعه ایشان نشان داد مدل از

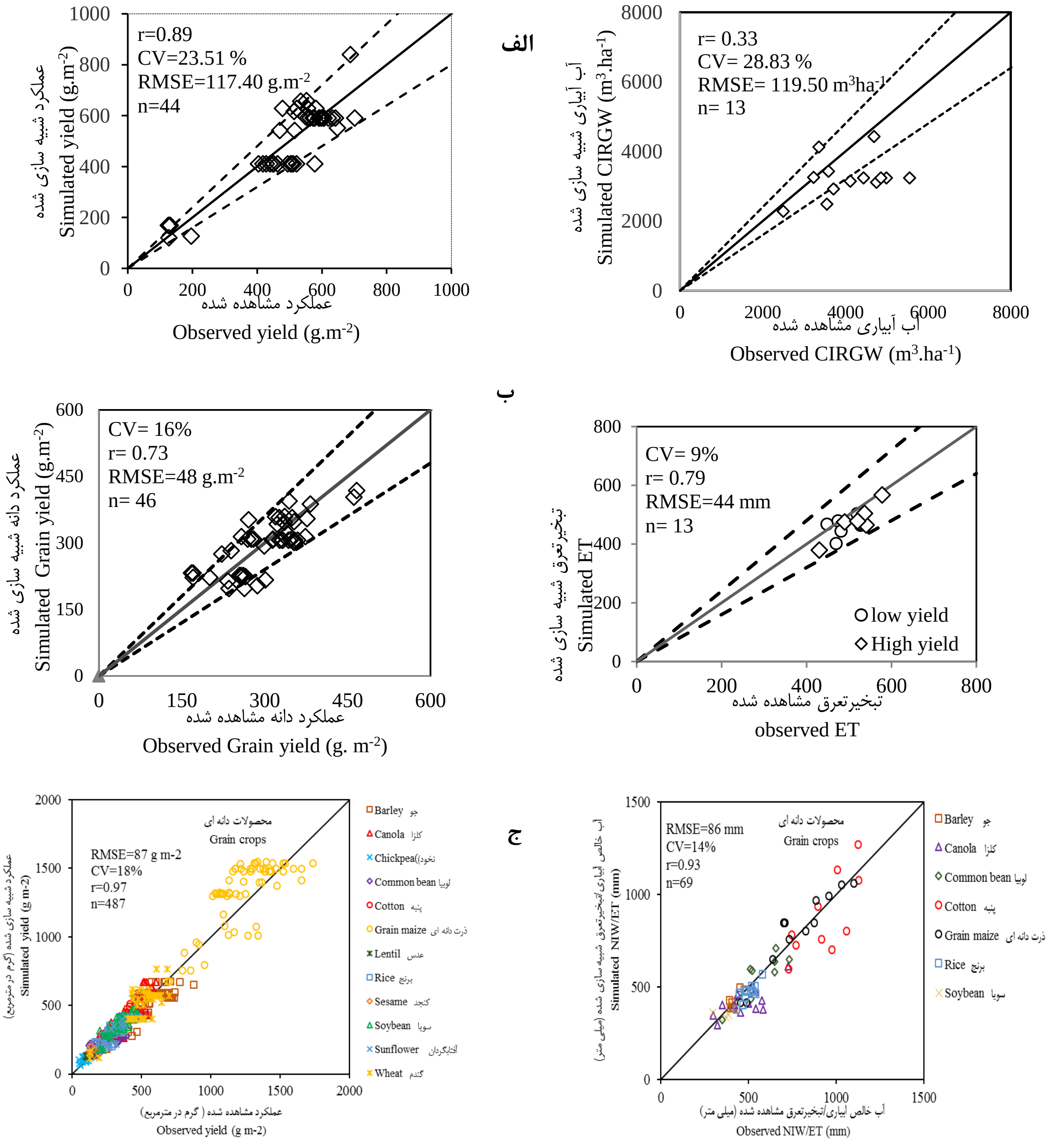
کارایی خوبی برای شبیه‌سازی در شرایط تنش آبی را دارد به‌طوری‌که ضریب تغییرات برای شبیه‌سازی عملکرد ۳/۵، ماده خشک ۱/۷، شاخص سطح برگ ۳/۳، وزن هزار دانه ۱/۸، شاخص برداشت ۴/۱ می‌باشد و در مطالعات مشابه قابل استفاده است (Shiukhy Soqanloo *et al*., 2023).

در مطالعات قبلی نیز بیلان آب با استفاده از مدل‌ها برآورد شده است. به‌دلیل این که اندازه‌گیری بیلان آب در مزارع وقت‌گیر و پرهزینه است محققان معتقدند استفاده از مدل‌هایی که بتواند بیلان آب را شبیه سازی کند مفید است. اندازه‌گیری بیلان آب و آب استفاده شده توسط گیاه برای مدیریت آب در کشاورزی ضروری است (Dehghan *et al*., 2011). در مطالعاتی با استفاده از مدل‌های مختلف بیلان آب مزارع بررسی شد. بیلان آب و خاک با استفاده از مدل شبیه‌سازی AquaCrop برای عملکرد گندم (Akbari, 2011) و ذرت (Saeidi *et al*., 2021) تخمین اجزای بیلان آب با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAP (اگروهیدرولوژیک) برای گندم در منطقه نیشابور استفاده شده است و نشان داد مدل به خوبی می‌تواند جریان آب خاک را شبیه‌سازی کند. بنابراین استفاده از مدل‌ها به‌عنوان ابزاری مفید بدون هزینه و صرف وقت زیاد برای برآورد اجزای بیلان آب در سطح مزرعه قابل استفاده است (Dehghan *et al*., 2011). مدل‌های یاد شده بیشتر توسط متخصصین مهندسی آب و برای شرایط مطلوب استفاده شده است در حالی‌که در این مطالعه با رویکردی جدید و متفاوت و از دیدگاه متخصصین زراعت، کاربرد و توانایی مدل SSM در برآورد اجزای بیلان آب و عملکرد در شرایط واقعی و پتانسیل (برآوردهای شرایط واقعی و پتانسیل با استفاده از مدل SSM انجام شده است) مورد بررسی قرار گرفت با توجه به دقت مدل در برآوردها و تأیید نتایج ارزیابی و پارامتریابی مدل، استفاده از این مدل گیاهی محور در مطالعات مشابه (مدیریت آب در کشاورزی، برآورد بیلان آب، بهره‌وری آب، آب مجازی و غیره) قابل استفاده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی در شرایط کشاورزان کالیبره شد. کالیبراسیون با کمک مقایسه عملکرد کشاورزان در برابر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل و با تغییر پارامترهای کارایی استفاده از تشعشع (IRUE)، حداکثر سطح برگ (LAIMX) و حداکثر شاخص برداشت (HIMAX) صورت گرفت. نشان داده شد که با مدل کالیبره شده برای شرایط کشاورزان می‌توان به اطلاعات دیگری (مثل حجم آب آبیاری) که به راحتی قابل اندازه‌گیری نیستند، دست یافت و با این فرض که مدل این اطلاعات را هم مثل عملکرد با دقت قابل قبول برآورد می‌کند. از این مدل می‌توان برای تکمیل آزمایش‌های مزرعه‌ای استفاده نمود به این ترتیب که مدل بر اساس متغیرهایی مانند سطح برگ، عملکرد و شاخص برداشت که اندازه‌گیری آن راحت است کالیبره شود و از اطلاعات برآورد شده مربوط به بیلان آب که اندازه گیری آن در مزارع به سادگی امکان‌پذیر نیستند و نیازمند وقت، دقت، امکانات و هزینه بالایی هستند، استفاده نمود. این کاربرد مدل در شرایطی اهمیت پیدا می‌کند که اندازه‌گیری این اطلاعات در شرایط کشاورزان هم پرهزینه و هم زمان‌بر است. در این شرایط برآوردها با مدل کالیبره شده بهتر از دست روی دست گذاشتن است.

پیوست



شکل پیوست- آب آبیاری شبیه‌سازی شده در مقابل آب آبیاری مشاهده شده و عملکرد گندم شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد گندم اندازه گیری شده (الف: Zahed *et al*., 2019)؛ تبخیر تعرق شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل تبخیرتعرق مشاهده شده و عملکرد برنج (شلتوک) شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد برنج (شلتوک) اندازه‌گیری شده (ب: Keramat *et al*., 2020)؛ آب خالص آبیاری/تبخیرتعرق شبیه‌سازی شده با مدل در مقابل آب خالص آبیاری/تبخیرتعرق مشاهده شده و عملکرد محصولات دانه‌ای شبیه‌سازی شده با مدل SSM در مقابل عملکرد محصولات اندازه‌گیری شده (ج: Soltani *et al*., 2020b).

Supplementary figure- Simulated versus observed cumulative irrigation water (CIRGW) and simulated versus observed grain yield of wheat (a: Zahed *et al*., 2019). Simulated versus observed evapotranspiration (ET) and simulated versus observed grain yield of rice (paddy) (b: Keramat *et al*., 2020). Simulated versus observed net irrigation water (NIW) or evapotranspiration (ET) and grain yield of grain crops (c: Soltani *et al*., 2020b).

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده برای این مطالعه در مدل SSM-iCrop2 برای گندم آبی(رقمی مشابه تجن) و شلتوک (رقم دیررس با عملکرد متوسط)

Table 1- The parameters used for this study in the SSM-iCrop2 model for irrigated wheat a cultivar similar to Tajen) and rice (a late-maturing cultivar with medium yield).

پارامتر Parameter (Unit)	مخفف Abv	گندم آبی irrigated wheat	برنج (شلتوک) Rice
مراحل فنولوژی *Phenology*			
دمای پایه برای نمو Base temperature for development (°C)	TBD	0	8
دمای مطلوب تحتانی برای نمو Lower optimum temperature for development (°C)	TP1D	25	30
دمای مطلوب فوقانی برای نمو Upper optimum temperature for development (°C)	TP2D	28	37
دمای سقف برای نمو Ceiling temperature for development (°C)	TCD	40	45
واحد دمایی که جوانه‌زنی اتفاق می‌افتد(درجه سانتی‌گرادروز) Temperature unit for emergence (°C day)	tuEMR	132	2.2
واحد دمایی که در آن شروع مؤثر پر شدن دانه اتفاق می‌افتد (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for beginning seed growth occurs (°C day)	tuBSG	1620	1435
واحد دمایی که در آن پایان مؤثر پر شدن دانه اتفاق می‌افتد (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for termination seed growth occurs (°C day)	tuTSG	2172	2095
واحد دمایی برای بلوغ فیزیولوژیکی (پایان تجمع ماده خشک) (درجه سانتی‌گراد) Temperature unit for physiological maturity (end of dry mass accumulation) (°C)	tuPM	2170	-
واحد دمایی در زمان رسیدگی برداشت (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for harvest or leaf fall (°C day)	tuHAR	2400	2200
سطح برگ *Leaf area*			
نقطه ۱ شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی یا نرمالیزه شده** Point #1 Relative leaf area index versus relative or normalized development stage**	(X1, Y1)	(0.2, 0.06)	(0.01, 0.15)
نقطه ۲ شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی یا نرمالیزه شده** Point #2 Relative leaf area index versus relative or normalized development stage**	(X2, Y2)	(0.5, 0.88)	(0.7, 0.95)
شاخص سطح برگ حداکثر Maximum leaf area index	LAIMX	6.5	3.5
واحد دمایی تا رسیدگی که پیر شدن برگ اتفاق می‌افتد (درجه سانتی‌گراد روز) Thermal unit from planting to the beginning of leaf aging (°C)	tuBLS	1620	1435
ضریب سرعت پیر شدن برگ Leaf senescence rate coefficient	SRATE	1	1
آستانه انجماد برای مرگ برگ / دمای پایین (درجه سانتی‌گراد)	FrzTh	-5	8
مرگ نسبی برگ به ازای هر درجه کاهش دما زیر دمای پایین/ آستانه انجماد Relative leaf death per each degree below low temperature / freezing threshold	FrzLDR	0.01	0.01
دمای آستانه گرما برای پیرشدن برگ‌ها (درجه سانتی‌گراد) Heat threshold temperature for leaf senescence (°C)	HeatTH	30	37
افزایش نسبی سرعت پیری برگ به ازای هر درجه افزایش دما از دمای استانه گرما Relative increase in leaf senescence rate per each degree above heat threshold	HtLDR	0.1	0.1
ماده خشک *Dry matter*			

دمای پایه برای تولید ماده خشک (درجه سانتی‌گراد) Base temperature for dry matter production (°C)	TBRUE	0	5
دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک (درجه سانتی‌گراد Lower optimum temperature for dry matter production (°C)	TP1RUE	15	15
دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک (درجه سانتی‌گراد) Upper optimum temperature for dry matter production (°C)	TP2RUE	22	35
دمای سقف برای تولید ماده خشک (درجه سانتی‌گراد) Ceiling temperature for dry matter production (°C)	TCRUE	35	50
ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی Extinction coefficient for photosyntheticaly active radiation	KPAR	0.65	0.60
کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد (گرم بر مگاژول) Radiation use efficiency under optimal growth conditions (g MJ-1)	RUE	2.2	2.2
ضریب پاسخ RUE به غلظت CO_2 Coefficient for response of RUE to CO2 concentration	C3C4	0.8	0.8
تشکیل عملکرد *Yield formation*			
حداکثر شاخص برداشت Maximum harvest index	HImax	0.5	0.38
کسری از توده خشک قابل جابجایی از بافت رویشی به بذر / میوه در حال رشد (گرم بر گرم) Fraction of dry mass remobilizable from the vegetative tissue to the developing seeds/fruits (g g^{-1})	FRTRL	0.2	0.25
ضریب تبدیل دانه (گرم بر گرم) Grain conversion coefficient (g g^{-1})	GCC	1	1
روابط آب *Water relations*			
واحد دمایی برای شروع رشد ریشه (درجه سانتی‌گراد) Temperature unit for beginning root growth (°C)	tuBRG	132	0.001
واحد دمایی برای پایان رشد ریشه (درجه سانتی‌گراد) Temperature unit for termination root growth (°C)	tuTRG	1620	0.65
عمق ریشه در زمان سبز شدن (میلی‌متر) Initial depth of roots at emergence or beginning leaf growth (mm)	iDEPORT	200	200
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک توسط ریشه (میلی‌متر) Maximum effective depth of water extraction from soil (mm)	MEED	1000	250
ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient	TEC	5.8	5.8
کسر آب قابل دسترس خاک که در کم‌تر از آن تولید ماده خشک کم می‌شود FTSW threshold when dry matter production starts to decline	WSSG	0.3	0.6
کسر آب قابل دسترس خاک که در کم‌تر از آن گسترش سطح برگ کم می‌شود FTSW threshold when leaf area development starts to decline	WSSL	0.4	0.6
ضریب حساسیت نمو و پیر شدن به تنش خشکی Developmental susceptibility coefficient and aging to drought stress	WSSD	0.4	0

** به‌عنوان حداکثر سطح برگ گندم در شرایط مطلوب (PLAMX: ۱۸۶ سانتی‌متر مربع در هر بوته) با تراکم گیاه (۳۵۰ گیاه در متر مربع برای شرایط آبیاری) استفاده می‌شود.

** used as maximum wheat leaf area under optimal condition (PLAMX: 186 cm^2 per plant) product by plant density (350 plant per m^2 for irrigated conditions)

** به‌عنوان حداکثر سطح برگ برنج در شرایط مطلوب (PLAMX: ۵۰۰ سانتی‌متر مربع در هر بوته) با تراکم گیاه ۷۰ گیاه در متر مربع برای شرایط آبیاری) استفاده می‌شود.

** used as maximum Rice leaf area under optimal condition (PLAMX: 500 cm^2 per plant) product by plant density (70 plant per m^2 for irrigated conditions)

References

1. Akbari, Sh., & Soltani, A. (2017). Parameterization and evaluation of simple model for simulation of growth and yield of soybean in Tehran climatic condition. *Journal of Crops Improvment*, *19*(3), 751-765. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2017.60477
2. Akbari, M. (2011). Soil water balance and crop yield of winter wheat using AquaCrop simulation model. *Food Engineering Research*, *12*(4), 19-34. https://doi.org/10.22092/jaer.2012.100329
3. Akbari, M., Naseri, A., Noorjo, A., Parchami Iraqi, F., Nakhjavani Moghadam, M., Sepehri Sadeghian, S., Alimohammadi Nafchi, R., Eslami, A., Ghasemi, M., Gomrakchi, A., Kamali Pashai, M.A., Kia, A., Guderzi, M., & Behramlu, R. (2021). Determining the usable water of peaches and nectarines in the country. Final report of the research project. *Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Agricultural Research Organization of the country*, registration number 59624.
4. Abbasi, N., Taheri, M., Kiani, A., Yusuf Gomrakchi, A., Dehghanian, S.A., & Shahin Rakhsar, P. (2020). Determining the consumption of olive water in the country. Final report of the research project. *Technical Research Institute and . Agricultural Engineering, Agricultural Research Organization of the country*, registration number 57724. https://doi.org/10.4236/jacen.2017.64015
5. Abbasi, F., Jalini, M., Khormian, M., Dehghanian, S.A., Moqbli Doman, A., Nowrozi, M., Yusuf Gomrakchi, A., Taheri, M., Zare Mehrani, A., Kayani, A., Salah, N., Mousavi Fazl, H., Qadoumi Firouzabadi, A., Bayat, P., & Naseri, A. (2021). The role of modern irrigation systems in the management of tomato juice consumption in country. *Engineering Research of Irrigation and Drainage Structures*, *22*(82), 43-64.
6. Arabameri, R., Soltani, A., Zeinali, E., & Torabi, B. (2020). The amount and How to distribute of chickpea and lentil yield gap in Iran. *Journal of Crops Improvment*, *23*(2), 221-234. https://doi.org/10.22059/jci.2021.294686.2323
7. Baghani, J., Kayani, A., Firouzabadi, A., Shahrukhnia, M., Jalini, M., Khosravi, H., Alimohammadi Nafchi, R., Meiri, M., Behramlu, R., Akhwan, K., Salemi, H., Moqbli, A., Nikanfar, R., & Abbasi, M. (2019). Determination of water Consumption of potatoes in the country. Final report of the research project. *Technical and Engineering Research Institute*. *Agriculture, Agricultural Research Organization of the country*, registration number 57967.
8. Bregaglio, S., Willocquet, L., Kersebaum, K.Gh., Ferrise, R., Stella, T., Ferreira, T.B., Pavan, W., Asseng, S., & Savary, S. (2021). Comparing process-based wheat growth models in their simulation of yield losses caused by plant diseases. *Fild Crops Research*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108108
9. Bagheri, V., & Torabi, B. (2015). A simple model for simulation of growth, development and yield of faba bean in Golestan province. *Journal of Agricultural Crops Production*, *8*(2), 133-152. (In Persian with English abstract)
10. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. *Potato Research*, *63*, 545-563. https://doi.org/10.1007/s11540-020-09456-y
11. Dehghan, H., Alizadeh, A., & Haghayeghi, S.A. (2011). Water balance components estimating in farm scale using simulation model SWAP (Case study: Neyshabur region). *Water and Soil*, *24*(6), 1265-1275. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JSW.VOIO.7513
12. Diepen, C.V., Wolf, J., Keulen, H.V., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, *5*(1), 16-24. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x
13. Ghanem, M.E., Marrou, H., Biradar, C., & Sinclair, T.R. (2015). Production potential of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. *Agricultural Systems*, *137*, 24-38. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03005
14. Guiguitant, J., Marrou, H., Vadez, V., Gupta, P., Kumar, S., Soltani, A., Sinclair, T.R., & Ghanem, M.E. (2017). Relevance of limited-transpiration trait for lentil (*Lens culinaris* Medik.) in South Asia. *Field Crops Research*, *209*, 96-107. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.04.013
15. Hearn, A.B. (1994). OZCOT: A simulation model for cotton crop management. *Agricultural Systems*, *44*, 257-299. https://doi.org/10.1016/0308.521x(94)90223-3
16. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer. (1993). The IBSNAT Decade. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honoluly, Hawaii.
17. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., & Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, *18*, 235-265. https://doi.org/1016/s1161-0301(02)00107-7
18. Kiani, A., Kamali, M.A., & Abbasi, F. (2022). Investigating the efficiency of soybean irrigation water in fields of Golestan province. *Irrigation and drainage of Iran*, *16*(1), 69-82. (In Persian)
19. Karamat, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinli, A. (2020). Evaluation of production potential and rice yield gap in Iran using SSM-iCrop2 model. *Cereal Research*, *11*(3), 191-175. (In Persian). https://doi.org/10.22124/CR.2022.20959.1696
20. Kamari, H., Zeinli, A., Soltani, A., & Qadrifar, F. (2019). Parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model for predicting cotton growth and yield in Iran. Simulation of cotton growth and yield using SSM-iCrop2 model.

Iranian Cotton Researches, *8*(2), 72-49. (In Persian). https://doi.org/10.22092/IJCR.2021.127700.1137

21. Messina, C.D., Sinclair, T.R., Hammer, G.L., Curan, D., Thompson, J., Oler, Z., Gho, C., & Cooper, M. (2015). Limited-transpiration trait may increase maize drought tolerance in the US Corn Belt. *Agronomy Journal*, *107*(6), 1978-1986. https://doi.org/102134/agronj15.0016
22. McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., & Freebairn, D.M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural system research. *Agricultural Systems*, *50*, 255-271. https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V
23. Manschadi, A.M., Kaul, H.-P., Eitzinger, J., Friedel, J., Pötsch, E., Bodner, G., & Neubauer, T. (2019). Farm/IT – innovative digital technologies for strengthening the resilience of Austrian farming systems to climate risks. Presented at the 20. Österreichischer Klimatag, Climate Change Centre Austria (CCCA), 20. KLIMATAG - Facetten der österreichischen Klimaforschung, Vienna, Austria, p. 139.
24. Manschadi, A.M., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J., & Oberforster, M. (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, *135*, 126-487. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487
25. Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Rajabi, R. (2015). Parameterization and evaluation of SSM soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, *22*(2), 1–26. (In Persian with English abstract). https://doi.org/20.1001.1.23222050.1394.22.3.1.2
26. Pourshirazi, S., Soltani, A., Zainli, A., & Torabi, B. (2023). Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for alfalfa growth and yield in Iran. *Agroecology Journal*, *15*, 169-189. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/agry.2021.70433.1044
27. Rassam, G., & Soltani, A. (2007). Optimizing chickpea production management under rainfed conditions using the Computer simulation. In: Proceeding of 2nd National Symposium of Organic Farming, Oct 17–18. University of agriculture Sciences and Natural Resourcess, Gorgan. Iran. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jci.2021.294686.2323
28. Razzaghi, M., Kiani, A., & Abiyar, N. (2019). Cultivation and drying of rice, a technical and economic solution for rice production in the conditions of Golestan province. *Agricultural Water Management*, *7*(1), 33-44. (In Persian)
29. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). *AquaCrop Reference Manual*. FAO. Land and Water Division, Rome, Italy.
30. Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop model to predict phenology, yield, and water productivity of canola (*Brassica napus* L.) in Iran condition. *Agroecology Journal*, *13*(1), 157-177. https://doi.org/10.22067/JAG.V13I2.84057
31. Schoppach, R., Soltani, A., Sinclair, T.R., & Sadok, W. (2017). Yield comparison of simulated rainfed wheat and barley across Middle-East. *Agricultural Systems*, *153*, 101-108. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12017
32. Sinclair, T.R., Messina, C.D., Beatty, A., & Samples, M. (2010). Assessment across the United States of the benefits of altered soybean drought traits. *Agronomy Journal*, *102*(2), 475-482. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0195
33. Sinclair, T.R., Soltani, A., Marrou, H., Ghanem, M., & Vadez, V. (2020). Geospatial assessment for crop genetic and management improvements. *Crop Science*. https://doi.org/10.1002/csc2.20106
34. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crop Research*, *124*(2), 252-260. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021
35. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012). *Modeling physiology of crop development, growth and yield*, CABI, Wallingford, UK.
36. Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T.R. (2013). SSM-Wheat: a simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, *7*(4), 711-740. https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266
37. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crop Research*, *175*, 37-46.
38. Soltani, A., Nehbandani, A., Zeinali, A., Torabi, B., Zand, A., Ghasemi, S., Alasti, A., Dadrasi, A., Hossain, R., Alimaghm, S.M., Zahed, M., Mohamad Zadeh, Z., Kamari, H., Arabameri, R., Fayazi, H., Rahban, S., Mohamadi, S., & Keramat, S. (2018). *Providing a gap Atlas for the performance and potential of important crops in the country in present and futureclimates*. Gorgan. Sirang Press.
39. Soltani, A., Nehbandani, A., Aalimaqham, S.A., Dadarsi, A., Torabi, B., Zeinli, A., Zand, A., Ghasemi, S., Barani, H., Alasti, A., Hosseini, R., Zahed, M., Fayazi, H., Kamri, H., Arab Ameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Pourshirazi, S., Mohammadi, S., Keramat, S., Sosraei, N., Ashnavar, M., & Ahmadi, M. (2019). Modeling the growth and production of vegetation on a large scale with SSM-iCrop2: crops, vegetables, orchards and pastures. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, research project report
40. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadia, S., Keramat, V., Vadez, van Ittersum, M.K., & Sinclair, T.R. (2020a). SSMiCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855

41. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S.,Vadez, V., van Ittersum, M.K., & Sinclair, T.R. (2020b). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, *182*, 102855.
42. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vadez, V., Sinclair, T.R., & van Ittersum, M.K. (2020c). Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. *Agricultural Systems*, *183*, 102859. https://doi.org/10.1016/j.agasy.2020.102859
43. Stockle, C.O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping system simulation model. *European Journal of Agronomy*, *18*, 289-307. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0
44. Shiukhy Soqanloo, S., Mousavi Baygi, M., Torabi, B., & Raeini Sarjaz, M. (2023). Evaluating the SSM model efficiency in simulating the wheat growth under water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, *37*(3), 353-366. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237
45. Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Nazari, B., & Kaviani, A. (2021). Evaluation of AquaCrop model for estimating of changes process of soil moisture, evapotranspiration and yield of maize under salinity and fertility stresses. *Environment Stresses In Crop Sciences*, *14*(1), 195-210. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2473.1652
46. Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of SSM_iCrop model for prediction of growth and development of Faba bean in climatic conditions of Gorgan. *Journal of Crops Improvement*, *22*, 531-542. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2020.273742.2148
47. Vadez, V., Halilou, O., Hissene, H.M., Sibiry-Traore, P., Sinclair, T.R., & Soltani, A. (2017). Mapping water stress incidence and intensity, optimal plant populations, and cultivar duration for African groundnut productivity enhancement. Front. *Plant Science*, *8*, 432.
48. Van Evert, F.K., & Campbell, G.S. (1994). CropSyst: A collection of object-oriented simulation models of agricultural system. *Agronomy Journal*, *86*, 325-331. https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600020022x
49. Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R., & Spanel, D.A. (1989). The EPIC crop growth model. Trans. ASAE, *32*(2), 497-0511.
50. Wolfgang Fuchs, D. (2021). Parameterisation and evaluation of the crop growth model SSM-iCrop for winter wheat grown in Eastern Austria. Doctor rerum naturalium technicarum Universität für Bodenkultur Wien. *Department of Crop Sciences. Institute of Agronomy*. 127p.
51. Zahed, Mm, Soltani, A., Zeinali, E., Totabi, B., Zand, S., & Alimagham, S.M. (2019). Modeling of irrigated wheat yield potential and gap in Iran. *Journal of Crop Production*, *12*(3), 35-52. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/EJCP.2019.15436.2150